

## **Dispositif à jonction tunnel magnétique et procédé d'écriture/lecture d'un tel dispositif**

### **5      Domaine technique de l'invention**

L'invention concerne un dispositif magnétique comportant successivement

- une première électrode,
- une jonction tunnel magnétique comportant successivement une  
10 première couche magnétique formant une couche de référence et  
ayant une aimantation fixe, une couche électriquement isolante  
constituant une barrière tunnel et une seconde couche magnétique  
formant une couche de stockage et ayant une aimantation de  
direction réversible,
- 15 - une couche intermédiaire,
- et une seconde électrode.

### **État de la technique**

20

Le document FR2832542 décrit un dispositif magnétique à jonction tunnel magnétique et des procédés d'écriture et de lecture utilisant ce dispositif. Comme représenté à la figure 1, la jonction tunnel comporte successivement une première couche magnétique formant une couche de référence 1 et ayant  
25 une aimantation 2 fixe, une couche électriquement isolante constituant une barrière tunnel 3 et une seconde couche magnétique formant une couche de stockage 4 et ayant une aimantation 5 de direction réversible, représentée par une flèche bidirectionnelle sur la figure 1. L'aimantation 5 de direction réversible de la couche de stockage 4 peut être orientée par rapport à l'aimantation 2 fixe

de la couche de référence 1, de manière à ce que les aimantations soient parallèles ou antiparallèles.

5 La température de blocage de l'aimantation de la couche de stockage 4 est inférieure à la température de blocage de la couche de référence 1. Le dispositif comprend aussi une source de courant 6, un interrupteur 7 et des moyens (non-représentés) pour appliquer un champ magnétique à la couche de stockage et, ainsi, orienter l'aimantation 5 de la couche de stockage 4 par rapport à l'aimantation 2 de la couche de référence 1 sans modifier l'orientation de  
10 l'aimantation 2 de la couche de référence 1.

Lors d'une phase d'écriture, c'est-à-dire lors d'une phase d'aimantation de la couche de stockage 4 par application d'un champ magnétique extérieur, on fait circuler un courant électrique I, à travers la jonction tunnel, pour chauffer la  
15 couche de stockage 4 au-delà de la température de blocage de son aimantation 5.

Lors d'une phase de lecture, l'orientation de l'aimantation 5 de la couche de stockage 4 par rapport à celle de la couche de référence 1 est mesurée par  
20 l'intermédiaire de la résistance de la jonction tunnel magnétique, qui dépend de l'orientation de l'aimantation 5 de la couche de stockage 4 par rapport à celle de la couche de référence 1.

Pendant l'écriture, une tension de l'ordre de 0,5 V est appliquée aux bornes de la jonction, nécessitant une puissance électrique relativement élevée. Par  
25 ailleurs, la jonction peut être endommagée par cette puissance. La tension appliquée pour la lecture est typiquement de 0,3V. La jonction tunnel est alors également chauffée pendant la lecture, ce qui augmente le risque d'une écriture inopinée.

La figure 2 représente l'énergie potentielle 8 des électrons dans une jonction tunnel soumise à une différence de potentiel  $V$ . La jonction est constituée par une couche émettrice d'électrons et une couche réceptrice d'électrons, disposées de part et d'autre de la barrière tunnel placée à  $X_0$  et ayant respectivement des niveaux de Fermi supérieur  $E_{fs}$  et inférieur  $E_{fi}$ . La différence des niveaux de Fermi est proportionnelle à la différence de potentiel :  $E_{fs} - E_{fi} = eV$ ,  $e$  étant la charge élémentaire de l'électron. Comme illustré par la flèche 9, un électron émis par la couche émettrice traverse la barrière tunnel, par effet tunnel, sans dissiper de l'énergie. Ensuite, lors de la relaxation inélastique de l'électron d'une énergie supérieure  $E_{fs}$  vers une énergie inférieure  $E_{fi}$ , l'électron dissipe l'énergie  $eV$  dans la couche réceptrice d'électrons, par exemple par création de phonons 10 et/ou de magnons 11, ce qui augmente la température de la couche réceptrice d'électrons. La relaxation inélastique a lieu sur une longueur caractéristique, le libre parcours moyen inélastique  $\lambda_{in}$ , qui est typiquement de l'ordre de quelques nanomètres dans les matériaux magnétiques usuellement utilisés dans les jonctions tunnel magnétiques. Ainsi, la production de chaleur par le courant tunnel est maximale dans une zone d'une épaisseur de quelques nanomètres, localisée dans la couche réceptrice et adjacente à la barrière tunnel.

La jonction tunnel décrite dans le document FR2832542 peut également comporter une couche antiferromagnétique, par exemple en NiMn, disposée sur une face opposée à la barrière tunnel de la couche de référence de la jonction tunnel. De plus, sur une face opposée à la barrière tunnel de la couche de stockage de la jonction tunnel peut également être disposée une couche antiferromagnétique, par exemple en FeMn ou en Ir<sub>20</sub>Mn<sub>80</sub>. Les couches antiferromagnétiques remplissent la fonction de maintenir l'orientation magnétique des couches de stockage et de référence. Le dépôt des couches

constituant la jonction tunnel sur la couche antiferromagnétique et la nano-structuration des jonctions nécessitent éventuellement des étapes supplémentaires, par exemple une étape d'alignement. De plus, le risque d'un court-circuit de la barrière tunnel est augmenté.

5

Le document WO00/79540 décrit une mémoire magnétique constituée par un empilement de couches minces. Le document propose d'isoler thermiquement des cellules mémoire afin de permettre d'atteindre une température Curie avec un courant électrique de chauffage réduit, notamment par l'intermédiaire d'une  
10 couche d'isolation thermique ayant une conductivité électrique suffisante tout en ayant une conductivité thermique faible par rapport à l'aluminium. Le matériau de la couche d'isolation thermique est, par exemple, un composé de tantale et d'azote (TaN) ou du tungstène (W).

15 Cependant, l'introduction d'une telle couche d'isolation thermique présente des problèmes additionnels d'intégration avec la jonction tunnel, à savoir une augmentation de la rugosité de la surface et l'augmentation du temps de gravure nécessaire pour définir le point mémoire. Une telle couche d'isolation thermique nécessiterait des étapes supplémentaires de polissage et gravure,  
20 qui compliquent le procédé de dépôt et de fabrication de la jonction.

### Objet de l'invention

25 L'invention a pour but de remédier à ces inconvénients et, en particulier, de réaliser un dispositif permettant de chauffer la couche de stockage efficacement tout en minimisant la puissance électrique nécessaire pour cet échauffement, afin de réduire la consommation électrique du dispositif, et de minimiser le

risque d'un court-circuit de la jonction tunnel tout en simplifiant le procédé de fabrication.

Selon l'invention, ce but est atteint par les revendications annexées et, en particulier, par le fait que la couche intermédiaire constitue une première barrière thermique constituée par un matériau ayant une conductivité thermique inférieure à  $5\text{W/m}^\circ\text{C}$ .

L'invention a également pour but un procédé de lecture/écriture d'un dispositif magnétique selon l'invention,

- une phase d'écriture comportant la circulation d'un courant électrique, à travers la jonction tunnel, de la seconde couche magnétique vers la première couche magnétique, de manière à échauffer la seconde couche magnétique à une température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de la seconde couche magnétique,
- et une phase de lecture comportant la circulation d'un courant électrique, à travers la jonction tunnel, de la première couche magnétique vers la seconde couche magnétique.

### Description sommaire des dessins

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, dans lesquels :

La figure 1 représente un dispositif comportant une jonction tunnel magnétique selon l'art antérieur.

La figure 2 représente les variations d'énergie des électrons dans une jonction tunnel selon l'art antérieur, soumise à une différence de potentiel.

Les figures 3 à 5 représentent trois modes de réalisation particuliers d'un dispositif magnétique selon l'invention.

5 La figure 6 représente deux distributions de température théoriques dans une jonction tunnel magnétique, respectivement pour un courant circulant de la couche de stockage vers la couche de référence et dans le sens inverse.

Les figures 7 à 9 représentent différentes distributions de température théoriques et correspondent respectivement aux modes de réalisation  
10 représentés aux figures 3, 4 et 5.

#### **Description de modes particuliers de réalisation**

15 Un dispositif magnétique selon l'invention comporte des première et seconde électrodes entre lesquelles est disposée une jonction tunnel telle que celle représentée à la figure 1, une barrière thermique constituée par un matériau ayant une faible conductivité thermique étant en contact avec au moins une des couches magnétiques de la jonction tunnel, de manière à concentrer la chaleur  
20 produite par le courant tunnel dans la couche de stockage, pendant les phases d'écriture.

Sur la figure 3, le dispositif magnétique comporte successivement, selon un axe X, la première électrode 12, une jonction tunnel telle que celle représentée à la  
25 figure 1, une première barrière thermique et la seconde électrode 13. La première barrière thermique est constituée par une couche 14 intermédiaire disposée entre la couche de stockage 4 et la seconde électrode 13. Les électrodes 12 et 13 sont à température ambiante et permettent de refroidir la jonction tunnel après les phases d'écriture et de lecture.

Selon l'invention, la couche 14 intermédiaire constituant la première barrière thermique est constituée par un matériau ayant une conductivité thermique inférieure à  $5\text{W/m/}^{\circ}\text{C}$ . En effet, le dépôt, sur une couche 14 intermédiaire, des couches constituant la jonction tunnel est d'autant plus simple que l'épaisseur de la couche 14 intermédiaire est faible. En particulier, la rugosité d'une couche 14 fine est généralement plus faible et le risque d'un court-circuit d'une jonction tunnel déposée sur une couche 14 fine est réduit. Or, pour une résistance thermique prédéterminée, la couche 14 intermédiaire peut présenter une épaisseur d'autant plus faible que sa conductivité thermique est faible.

Les composés utilisés dans l'art antérieur ne sont pas satisfaisant à cet égard. C'est en particulier le cas du composé de tantale et d'azote (TaN) ou du tungstène (W) mentionnés dans le document WO00/79540 précité, qui ont respectivement une conductivité thermique d'environ  $35\text{W/m/}^{\circ}\text{C}$  et d'environ  $173\text{W/m/}^{\circ}\text{C}$ . C'est également le cas des couches antiferromagnétiques en FeMn ou en Ir<sub>20</sub>Mn<sub>80</sub> mentionnées dans le document FR2832542 précité, qui ont respectivement des conductivités thermiques de  $44\text{ W/m/}^{\circ}\text{C}$  et  $35,6\text{ W/m/}^{\circ}\text{C}$ . L'utilisation des couches antiferromagnétiques comme barrière thermique nécessiterait une épaisseur élevée, ce qui rendrait le dépôt des couches constituant la jonction tunnel sur la couche antiferromagnétique et la nanostructuration des jonctions plus difficile.

De plus, les matériaux ayant une conductivité thermique inférieure à  $5\text{W/m/}^{\circ}\text{C}$  permettent également d'obtenir une faible capacitance thermique de la barrière thermique, ce qui permet d'obtenir une constante de temps thermique faible. La constante de temps thermique correspond au produit ( $R_{th}.C_{th}$ ) de la résistance thermique  $R_{th}$  d'une barrière thermique et de la capacitance thermique  $C_{th}$  de la

barrière thermique. Un gradient thermique peut être établi, lors d'une phase d'écriture, d'autant plus vite que la constante de temps thermique est faible.

Sur la figure 4, en plus de la première barrière thermique, le dispositif comporte une deuxième barrière thermique, constituée par une couche 15 disposée entre la première électrode 12 et la couche de référence 1.

La couche de stockage 4 peut être constituée d'une couche unique de matériau magnétique ou d'une multicouche, dont le champ coercitif diminue rapidement lorsque la température est augmentée, dans un intervalle de température compris entre 20°C et 250°C. Par exemple, le matériau de la couche de stockage peut être un alliage de terbium (Tb) et de cobalt (Co) enrichi en cobalt près de l'interface entre la couche de stockage 4 et de la barrière tunnel 3, ce qui permet d'augmenter la polarisation des électrons traversant la barrière tunnel 3. L'alliage de Tb et de Co a une température de blocage proche de la température ambiante. La couche de stockage 4 peut également être constituée par une multicouche de répétition à aimantation perpendiculaire au plan des couches, par exemple par une alternance de deux couches en cobalt (Co) et en platine (Pt), ayant respectivement une épaisseur de 0,5nm et de 2nm.

De préférence, la couche de stockage 4 est constituée par un empilement d'une couche ferromagnétique et d'une couche antiferromagnétique, par exemple en un composé de fer et de manganèse, par exemple du FeMn, ou en un composé d'iridium et de manganèse, comportant par exemple 20% de Ir et 80% de Mn, ayant une température de blocage comprise entre 130°C et 250°C.

De préférence, les première et/ou deuxième barrières thermiques ont une conductivité électrique telle que la résistance électrique de la barrière thermique soit sensiblement plus faible que la résistance électrique de la barrière tunnel 3,



de préférence au moins d'un facteur dix. En effet, la barrière thermique étant connectée en série avec la barrière tunnel 3 le signal de magnétorésistance est d'autant plus faible que la résistance électrique de la barrière thermique est grande.

5

Le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques comporte, de préférence, au moins un alliage comportant au moins un élément choisi parmi l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), le bismuth (Bi), le germanium (Ge), l'étain (Sn) et le plomb (Pb), d'une part, et comportant au moins un élément choisi parmi le soufre (S), le sélénium (Se), le tellure (Te), l'aluminium (Al), le gallium (Ga), l'indium (In) et le thallium (Tl) d'autre part. Ainsi, le matériau des barrières thermiques peut être un alliage de bismuth (Bi) et de tellure (Te), par exemple le BiTe ou le Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, qui présente une conductivité électrique relativement bonne d'environ 1,75mΩcm pour une très faible conductivité thermique d'environ 1,5W/m/°C. D'autres exemples pour le matériau des barrières thermiques sont les alliages de thallium, d'étain et de tellure, par exemple Tl<sub>2</sub>SnTe<sub>5</sub>, les alliages de thallium, de bismuth et de tellure, par exemple Tl<sub>9</sub>BiTe<sub>6</sub>, les alliages de strontium (Sr), de gallium et de germanium, par exemple le Sr<sub>8</sub>Ga<sub>16</sub>Ge<sub>30</sub>, et les alliages de strontium, d'euporium (Eu), de gallium et de germanium, par exemple le Sr<sub>4</sub>Eu<sub>4</sub>Ga<sub>16</sub>Ge<sub>30</sub>. Il est à noter que l'alliage de bismuth et de tellure fait partie des matériaux thermoélectriques qui présentent souvent une conductivité thermique très faible.

15

20

25

Le matériau des barrières thermiques peut également être un matériau à changement de phase, pouvant présenter, à température ambiante, une phase cristalline et une phase amorphe. Typiquement, l'état amorphe présente une forte résistivité électrique, tandis que l'état cristallin présente une résistivité électrique faible. Pour l'utilisation d'un matériau à changement de phase pour les première et/ou deuxième barrières thermiques, le matériau doit être dans

son état cristallin. La conductivité thermique des matériaux à changement de phase est typiquement inférieure à 5W/m/°C, dans l'état amorphe et dans l'état cristallin. Par exemple, l'alliage de germanium, d'antimoine et de tellure  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  et l'alliage  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ont respectivement des conductivités thermiques d'environ 0,3W/m/°C et d'environ 1,2W/m/°C. Afin d'obtenir une couche dans un état cristallin, il est généralement nécessaire d'effectuer un traitement thermique. Le traitement thermique est avantageusement effectué avant le dépôt des couches constituant la jonction tunnel.

Le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques peut également être un matériau comportant au moins un alliage comportant au moins un élément choisi parmi le phosphore (P), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb) et comportant au moins un élément choisi parmi le fer (Fe), le ruthénium (Ru), l'osmium (Os), le cobalt (Co), le rhodium (Rh), l'iridium (Ir) et le zinc (Zn), comme, par exemple, les alliages  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  et  $\text{CoFe}_4\text{Sb}_{12}$ . De plus, le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques peut comporter au moins un élément choisi parmi le lanthane (La), le cérium (Ce), le praséodyme (Pr), le néodyme (Nd), le samarium (Sm), l'euporium (Eu), le gadolinium (Gd), le thulium (Tm), l'ytterbium (Yb), le thorium (Th) et l'uranium (U), comme, par exemple, les alliages  $\text{Yb}_{0,2}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ ,  $\text{LaThFe}_3\text{CoSb}_{12}$ ,  $\text{EuCo}_4\text{Sb}_{12}$  et  $\text{EuCoSb}_{12}\text{Ge}_{0,5}$ .

Lorsque la première barrière thermique est constituée par une couche magnétique, par exemple antiferromagnétique, une couche 19 de découplage magnétique peut être disposée entre la première barrière thermique, constituée par la couche 14, et la couche de stockage 4, comme représenté à la figure 5, afin de découpler la barrière thermique magnétique de la couche de stockage 4. Le matériau de la couche 19 de découplage magnétique peut être un matériau non-magnétique choisi parmi le tantale, le chrome, le vanadium, le manganèse

et le platine. Dans le cas d'une deuxième barrière thermique antiferromagnétique, un découplage magnétique entre la deuxième barrière thermique et la couche de référence n'est pas nécessaire, car l'aimantation de la couche de référence est piégée.

5

Dans le mode de réalisation particulier représenté à la figure 5, une troisième barrière thermique est constituée par la barrière tunnel 3 elle-même. Par exemple la barrière tunnel peut être en oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), oxyde de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ) ou oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). Les conductivités thermiques de l'oxyde de zirconium et de l'oxyde de titane sont respectivement 1,5W/m/°C et 7,4W/m/°C.

10

La variation de température dans un dispositif selon l'art antérieur a été étudiée. Ainsi, la figure 6 représente deux distributions de température théoriques dans un dispositif magnétique comportant une jonction tunnel magnétique selon l'art antérieur, respectivement pour un courant circulant de la couche de stockage 4 vers la couche de référence 1 (courbe 17) et dans le sens inverse (courbe 18). Afin de faire ressortir la symétrie du profil de température généré par le passage du courant, la structure de cet exemple a été volontairement choisie symétrique.

15

20

Le dispositif comporte successivement, selon l'axe X, entre la première électrode 12 et la seconde électrode 13 :

25

- une couche de tantale (Ta) d'une épaisseur de 5 nm disposée dans l'intervalle compris entre X1 et X2 sur la figure 6,
- un empilement d'une couche de 5nm de IrMn et d'une couche de 3nm de NiFe constituant la couche de référence 1 (X2-X0),
- une couche d'alumine de 0,6nm constituant la barrière tunnel 3, représentée, de par sa finesse, par la ligne pointillée disposée à X0,
- un empilement d'une couche de 3nm de NiFe et d'une couche de 5nm de IrMn constituant la couche de stockage 4 (X0-X3)

- et d'une couche de Ta d'une épaisseur de 5 nm (X3-X4).

Le dispositif est alors symétrique par rapport à la coordonnée X0 et ne comporte pas de barrière thermique. Les courbes 17 et 18 sont obtenues pour une jonction tunnel connectée à ces bornes à deux électrodes de cuivre, maintenues  
5 à température ambiante et ayant une différence de potentiel de 0,5V.

On observe sur la figure 6 une asymétrie des distributions de température 17 et 18. En effet, un courant circulant de la couche de stockage 4 vers la couche de référence 1 (courbe 17) correspond à un mouvement d'électrons de la couche  
10 de référence 1 vers la couche de stockage 4 (vers la droite, sur la figure), ce qui implique une dissipation de leur énergie dans la couche de stockage 4 ((X0-X3), c'est-à-dire dans une zone disposée à droite de la barrière tunnel (X0), comme représenté à la figure 2. Ceci est illustré par l'amplitude de la courbe 17, plus importante pour des valeurs de X supérieures à X0 que pour des valeurs  
15 inférieures à X0. La courbe 18 correspond à un mouvement d'électrons circulant de la droite vers la gauche sur la figure 6 et créant, ainsi, plus de chaleur pour des valeurs inférieures à X0.

Ainsi, pour un courant donné, la direction du courant permet de définir dans la  
20 jonction la couche magnétique 1 ou 4 s'échauffant le plus. Ainsi, on peut réaliser un procédé de lecture/écriture d'un dispositif magnétique selon l'invention. Une phase d'écriture comporte la circulation d'un courant électrique I1 (figure 5), à travers la jonction tunnel, de la couche de stockage 4 vers la couche de référence 1, de manière à échauffer la couche de stockage 4 à une température  
25 supérieure à la température de blocage de l'aimantation 5 de la couche de stockage 4, tandis qu'une phase de lecture comporte la circulation d'un courant électrique I2 (figure 5), à travers la jonction tunnel, dans le sens inverse, c'est-à-dire de la couche de référence 1 vers la couche de stockage 4. Ainsi, la couche de stockage 4 est échauffée efficacement pendant les phases d'écriture, tandis

que l'échauffement de la couche de stockage 4 pendant les phases de lecture est diminué. Les courants I1 et I2 peuvent, par exemple, être générés par un générateur réversible 16.

5 La variation de température dans un dispositif selon l'invention est illustrée aux figures 7 à 9. Les distributions de température théoriques (courbes K1 à K5) représentées aux figures 7 à 9 sont obtenues pour une direction du courant électrique de la couche de stockage 4 vers la couche de référence 1, c'est-à-dire pour un mouvement des électrons de la couche de référence 1 vers la  
10 couche de stockage 4, et correspondent ainsi aux phases d'écriture.

Les courbes K1 à K5, ainsi que les courbes 17 et 18, illustrent la distribution de température en fin d'une impulsion de courant d'une durée de 500ps et d'une intensité de  $250\text{mA}/\mu\text{m}^2$ , correspondant à un produit de la résistance R de la  
15 jonction tunnel et de la surface S de la jonction tunnel  $RS=2\Omega\mu\text{m}^2$ . Pendant la durée de l'impulsion, la température de la jonction s'élève rapidement pour atteindre un régime permanent correspondant au maximum de température. Puis, lorsque le courant est annulé, la température retombe rapidement vers la température ambiante par diffusion de la chaleur vers les électrodes 12 et 13  
20 extérieures qui agissent comme des thermostats.

Les trois courbes K1, K2 et K3 représentées à la figure 7 illustrent l'évolution des distributions de température dans des dispositifs magnétiques selon la figure 3 comportant différentes couches 14. Lesdits dispositifs magnétiques  
25 comportent également chacun une couche de tantale, disposée dans l'intervalle comprise entre X1 et X2 sur la figure 7 (non-représentée à la figure 3).

Ainsi, la couche 14 du dispositif magnétique pour la courbe K1 est constituée par un empilement d'une couche de BiTe d'une épaisseur de 5nm (X3-X4) et

d'une couche de Ta d'une épaisseur de 5nm (X4-X5), disposées successivement entre la couche de stockage 4 et la seconde électrode 13.

5 La couche 14 pour la courbe K2 est constituée par un empilement d'une couche de Ta d'une épaisseur de 5nm (X3-X4) et d'une couche de BiTe d'une épaisseur de 5nm (X4-X5), disposées successivement entre la couche de stockage 4 et la seconde électrode 13.

10 La couche 14 correspondant à la courbe K3 est constituée par un empilement d'une couche de Ta d'une épaisseur de 5nm (X3-X4) et d'une couche de BiTe d'une épaisseur de 10nm (X4-X6), disposées successivement entre la couche de stockage 4 et la seconde électrode 13.

15 En effet, l'utilisation de barrières thermiques permet d'atteindre des températures comprises entre 100°C et 175°C dans la couche magnétique (X0-X3), donc plus importantes que les températures obtenues dans un dispositif selon l'art antérieur (figure 6, courbe 17, toujours nettement inférieure à 100°C). L'efficacité de la barrière thermique est d'autant meilleure que son épaisseur est importante. En effet, la courbe K3 est supérieure à la courbe K2. Cependant,  
20 l'épaisseur de la barrière thermique limite la cinétique de la diminution de température une fois que le courant est annulé.

Par ailleurs, afin de réduire la consommation électrique nécessaire pour l'échauffement, la couche de stockage 4 a, de préférence, une épaisseur faible,  
25 par exemple de l'ordre de 8nm.

Les distributions de température représentées par les courbes K1 à K3 sont obtenues pour une barrière tunnel 3 en alumine. L'alumine étant un bon conducteur thermique, la chaleur produite dans la couche de stockage 4

s'évacue en passant à travers la barrière tunnel 3 et la couche de référence 1 vers la première électrode 12. Afin de limiter cette déperdition de chaleur qui nuit à l'efficacité de l'échauffement, il est alors avantageux d'introduire la deuxième barrière thermique, représentée à la figure 4, pour confiner autant que possible la chaleur dans la couche de stockage 4.

La courbe K4 représentée à la figure 8 illustre la distribution de température d'un dispositif comportant une première et une deuxième barrière thermique, constituées respectivement par une couche 14 et une couche 15. La couche 15 est constituée par un empilement d'une couche de 5nm de Ta (X7-X1) et d'une couche de 5 nm de BiTe (X1-X2), disposées successivement entre la première électrode 12 et la souche de référence 1. La couche 14 est identique à la couche 14 correspondant à la courbe K1. La température dans la couche de stockage 4 (X0-X3) est de l'ordre de 300°C, donc plus importante que dans le cas de l'utilisation d'une première barrière thermique uniquement (courbe K1).

La figure 9 illustre la distribution de température (courbe K5) obtenue pour un dispositif comportant une troisième barrière thermique constituée par la barrière tunnel 3 elle-même et une première barrière thermique constituée par la couche 14. La barrière tunnel 3 est constituée par une couche en silice d'une épaisseur de 0,6nm. La couche 14 et la couche de référence 1 sont respectivement identiques à celles correspondant à la courbe K2. La température dans la couche de stockage 4 (X0-X3) est de l'ordre de 175°C (courbe K5), donc supérieure à la température d'un dispositif ayant une barrière tunnel 3 en alumine (courbe K2) dont la température ne dépasse pas les 150°C. En effet, la silice a une conductivité thermique (1,5W/m/°C) plus faible que l'alumine (36,7W/m/°C) et permet, ainsi, de confiner la chaleur plus efficacement dans la couche de stockage 4.

L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation représentés. En particulier, toute combinaison des première, deuxième et troisième barrières thermiques est possible.



## Revendications

### 1. Dispositif magnétique comportant successivement

- une première électrode (12),
- 5       - une jonction tunnel magnétique comportant successivement une première couche magnétique (1) formant une couche de référence et ayant une aimantation (2) fixe, une couche électriquement isolante constituant une barrière tunnel (3) et une seconde couche magnétique (4) formant une couche de stockage et ayant une
- 10       aimantation (5) de direction réversible,
- une couche (14) intermédiaire,
- et une seconde électrode (13),

dispositif caractérisé en ce que la couche (14) intermédiaire constitue une première barrière thermique constituée par un matériau ayant une conductivité

15       thermique inférieure à 5W/m/°C.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'une deuxième barrière thermique est constituée par une couche (15) disposée entre la première électrode (12) et la première couche magnétique (1).

3. Dispositif selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques a une conductivité électrique telle que la résistance électrique de la barrière thermique soit sensiblement plus faible que la résistance électrique de la barrière tunnel (3).

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques comporte au moins un alliage comportant au moins un élément choisi parmi l'arsenic, l'antimoine, le bismuth, le germanium, l'étain et le plomb et comportant au moins

un élément choisi parmi le soufre, le sélénium, le tellure, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium.

- 5 5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques comporte au moins un alliage comportant au moins un élément choisi parmi le phosphore, l'arsenic et l'antimoine et comportant au moins un élément choisi parmi le fer, le ruthénium, l'osmium, le cobalt, le rhodium, l'iridium et le zinc.
- 10 6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que le matériau des première et/ou deuxième barrières thermiques comporte au moins un élément choisi parmi le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le samarium, l'euporium, le gadolinium, le thulium, l'ytterbium, le thorium et l'uranium.
- 15 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que, la première barrière thermique étant constituée par une couche antiferromagnétique, le dispositif comporte une couche (19) de découplage magnétique disposée entre la première barrière thermique et la seconde couche magnétique (4).
- 20 8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que le matériau de la couche (19) de découplage magnétique est choisi parmi le tantale, le chrome, le vanadium, le manganèse et le platine.
- 25 9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'une troisième barrière thermique est constituée par la barrière tunnel (3).

**10.** Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce que le matériau de la barrière tunnel (3) est choisi parmi l'oxyde de silicium, l'oxyde de zirconium et l'oxyde de titane.

**5**     **11.** Procédé de lecture/écriture d'un dispositif magnétique selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que

- 10**     -     une phase d'écriture comporte la circulation d'un courant électrique (I1), à travers la jonction tunnel, de la seconde couche magnétique (4) vers la première couche magnétique (1), de manière à échauffer la seconde couche magnétique (4) à une température supérieure à la température de blocage de l'aimantation (5) de la seconde couche magnétique (4),
- 15**     -     et une phase de lecture comporte la circulation d'un courant électrique (I2), à travers la jonction tunnel, de la première couche magnétique (1) vers la seconde couche magnétique (4).

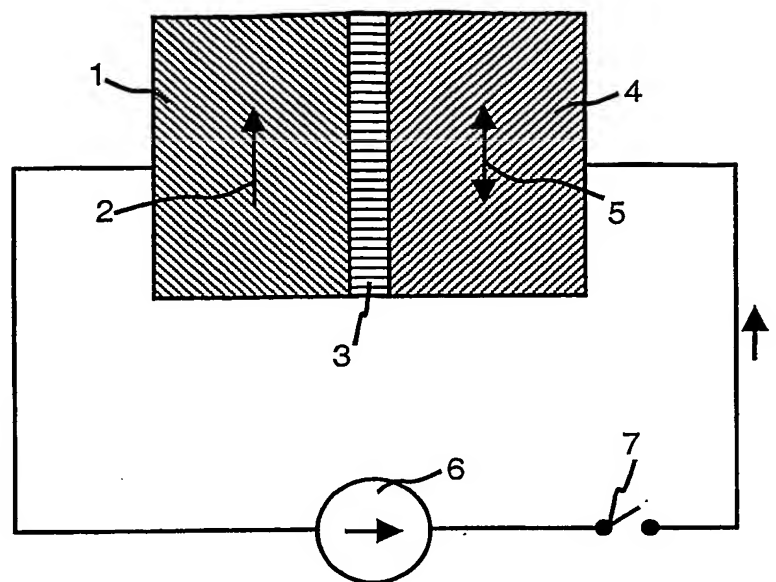


Figure 1 (art antérieur)

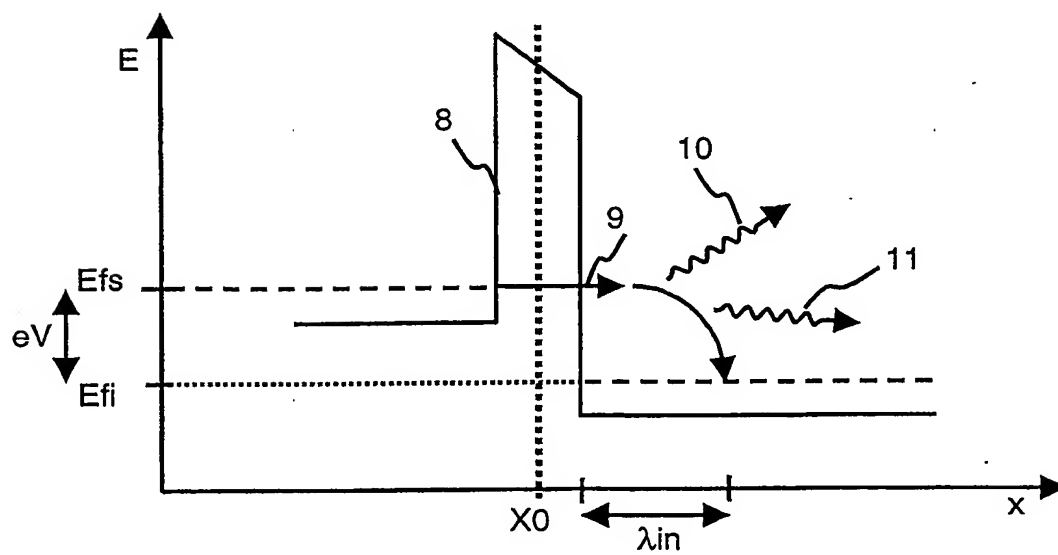


Figure 2 (art antérieur)

2/5

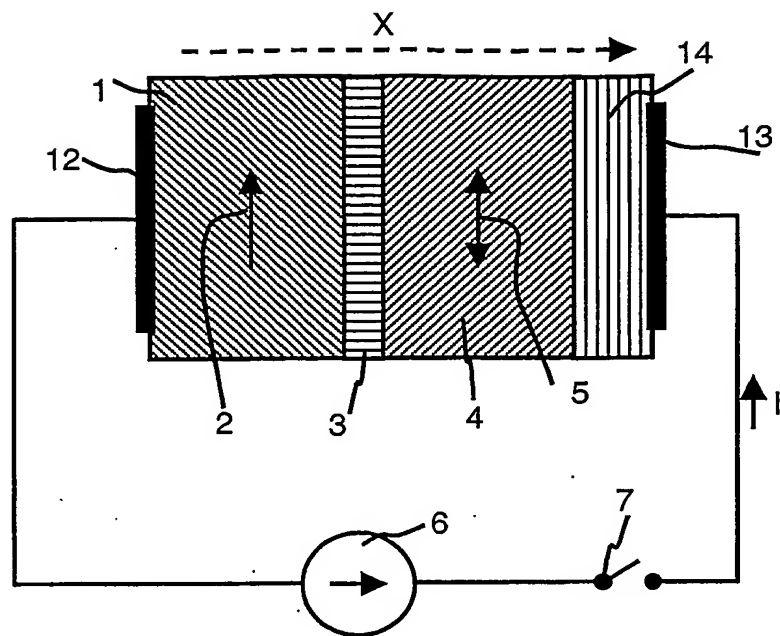


Figure 3

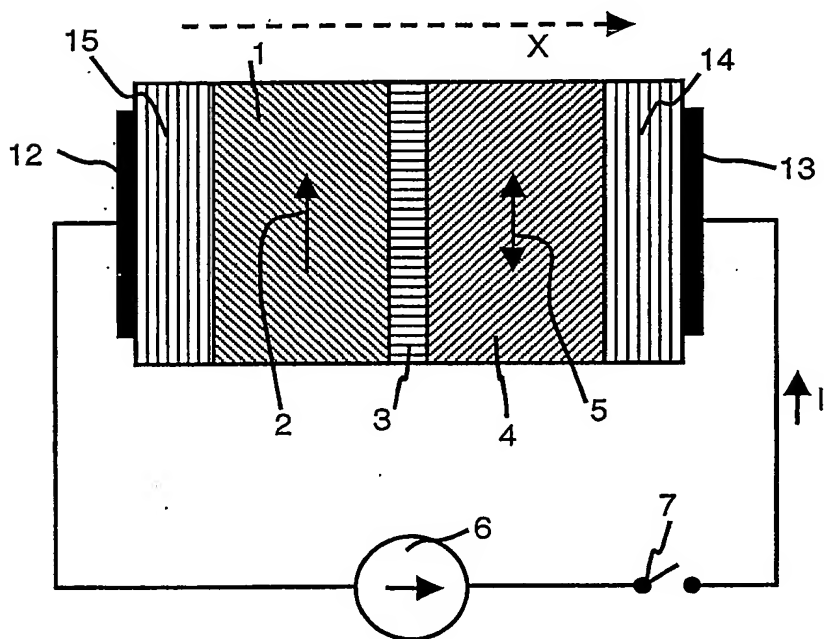


Figure 4

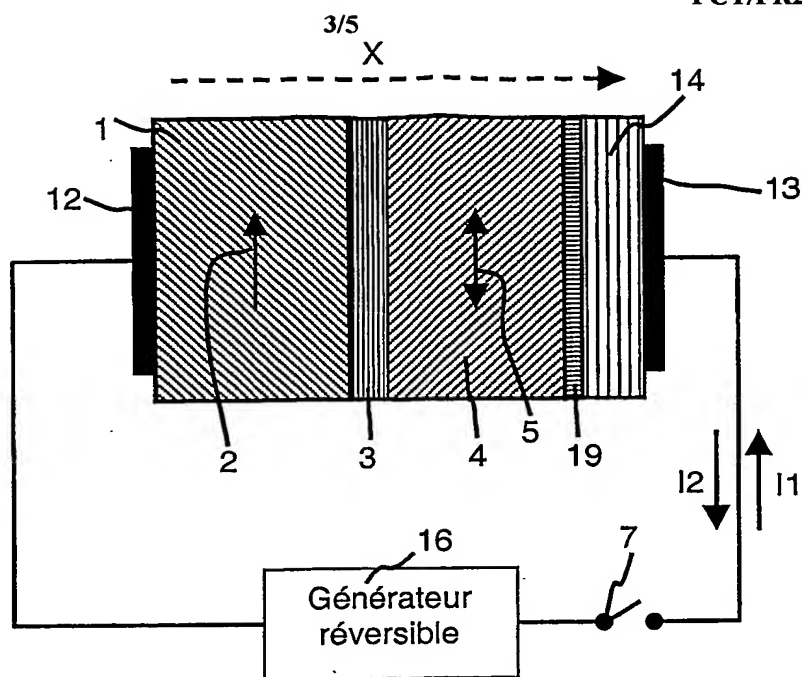


Figure 5

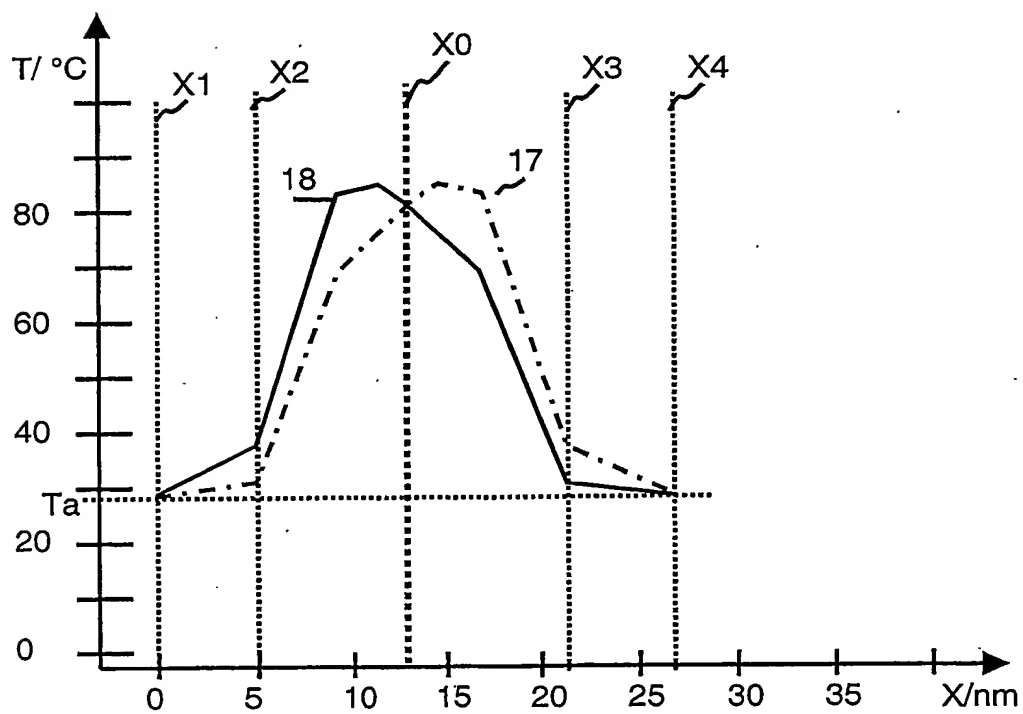


Figure 6

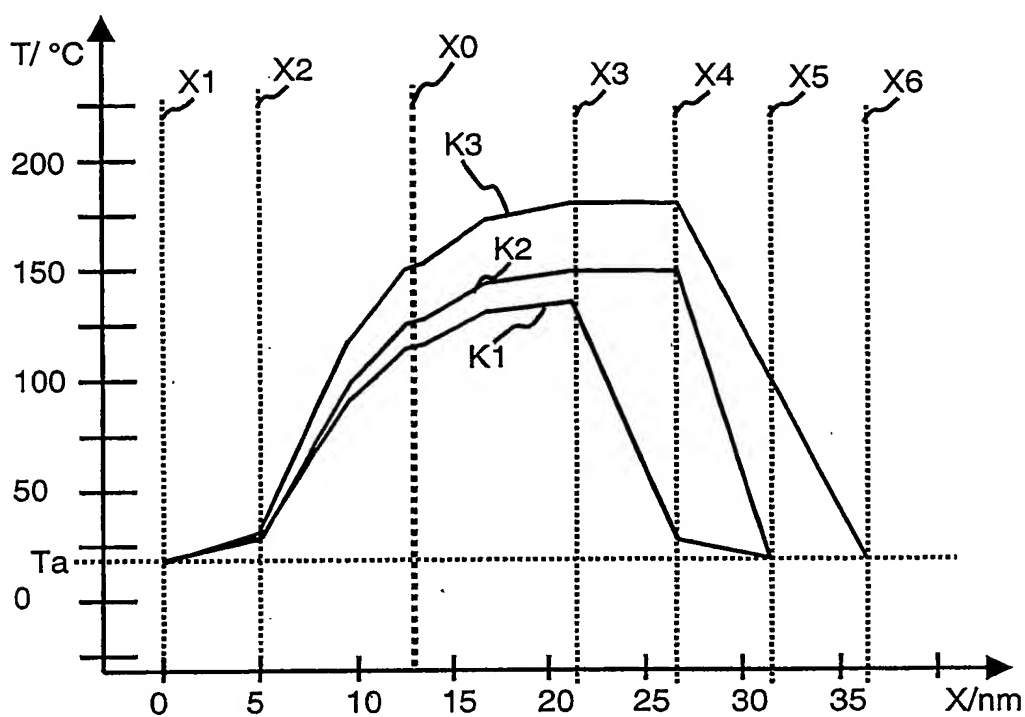


Figure 7

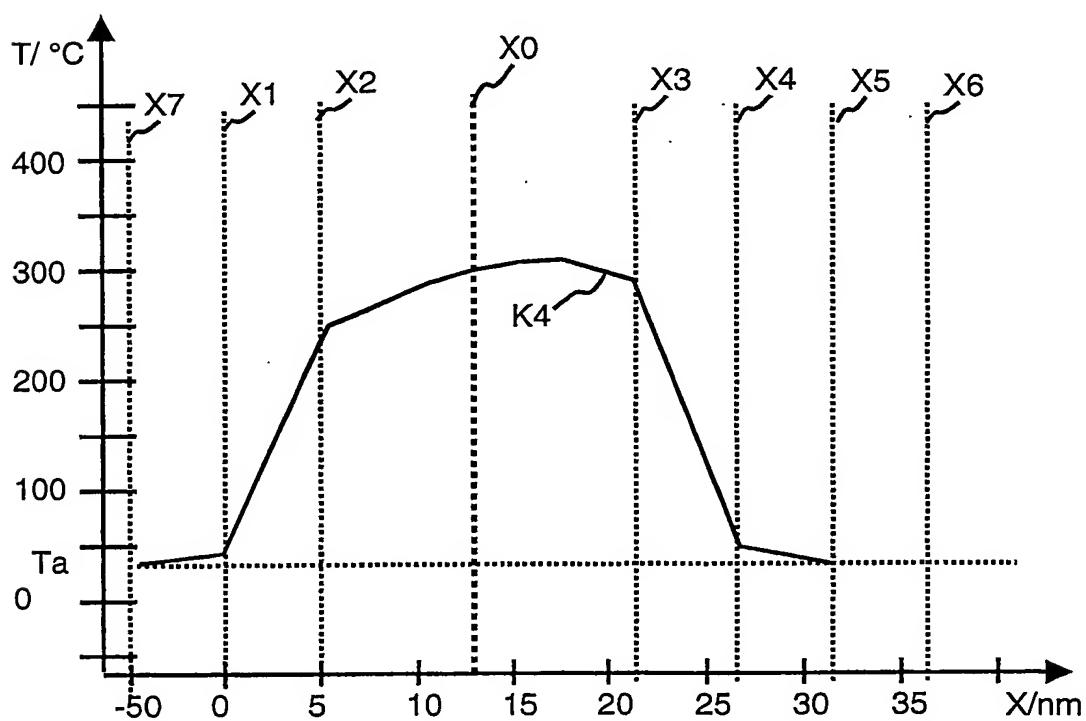


Figure 8

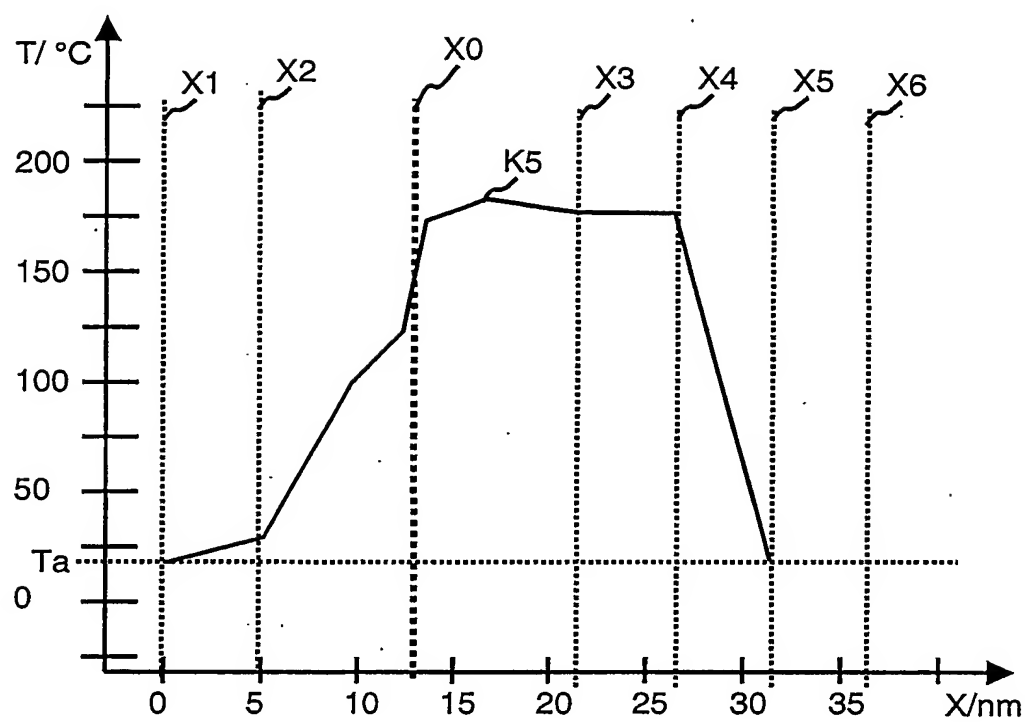


Figure 9



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR2004/002517

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G11C11/16

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G11C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E	WO 2005/001490 A (NVE CORP) 6 January 2005 (2005-01-06) figure 6 pages 22,32,33	1,2,7,9
P,A	US 2004/095801 A1 (IBM) 20 May 2004 (2004-05-20) figure 2 paragraph '0027!	1
A	FR 2 832 542 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 23 May 2003 (2003-05-23) figures 9,10 page 17, line 17 - page 18, line 4 page 28, line 9 - page 30, line 2 ----- -/--	1-3

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

\*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

\*E\* earlier document but published on or after the international filing date

\*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

\*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

\*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*&amp;\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 February 2005

Date of mailing of the international search report

23/02/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Havard, C

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International Application No  
 PCT/FR2004/002517

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6 385 082 B1 (TROUILLOUD PHILIP L ET AL) 7 May 2002 (2002-05-07) figure 5	1
A	WO 00/79540 A (NONVOLATILE ELECTRONICS INC ;POHM ARTHUR V (US); DAUGHTON JAMES M) 28 December 2000 (2000-12-28) figure 1A page 17, line 24 - page 20, line 13	1
A	BOULOUZ A ET AL: "PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF MOCVD BISMUTH TELLURIDE THIN FILMS" JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO. AMSTERDAM, NL, vol. 194, no. 3/4, December 1998 (1998-12), pages 336-341, XP000669099 ISSN: 0022-0248 page 336 page 339	4
A	ZOU H ET AL: "Growth of p- and n-type bismuth telluride thin films by co-evaporation" JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO. AMSTERDAM, NL, vol. 222, no. 1-2, January 2001 (2001-01), pages 82-87, XP004228292 ISSN: 0022-0248 page 82	4
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1999, no. 12, 29 October 1999 (1999-10-29) & JP 11 175921 A (HITACHI LTD), 2 July 1999 (1999-07-02) abstract	9,10
P,A	WO 03/094170 A (INFINEON TECHNOLOGIES AG) 13 November 2003 (2003-11-13) figures 1,2 page 7, line 6 - line 14 page 14, line 9 - line 15	1-3
A	US 2003/007398 A1 (POHM ARTHUR V ET AL) 9 January 2003 (2003-01-09) paragraph '0106!	1-11
A	US 2003/123282 A1 (TRAN LUNG T ET AL) 3 July 2003 (2003-07-03) figure 1	1-11

-/--

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR2004/002517

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 829 867 A (CENTRE NAT RECH SCIENT) 21 March 2003 (2003-03-21) the whole document -----	1-11
A	DIENY;SOUSA: "Bias current heating in spin dependent tunnel junctions" 26 September 2003 (2003-09-26), MINATEC 2003, GRENOBLE, FRANCE, XP002280171 the whole document -----	1-10
A	WO 03/077257 A (AGENCY FOR SCIENCE TECHNOLOGY ;LI KE BIN (SG); QIU JIN JUN (SG); W) 18 September 2003 (2003-09-18) page 8, line 15 - page 9, line 19 -----	1-10
A	US 5 933 365 A (KLERSY PATRICK ET AL) 3 August 1999 (1999-08-03) abstract column 13, line 47 - column 14, line 64 -----	1-10

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2004/002517

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2005001490	A	06-01-2005	US 2005002267 A1 WO 2005001490 A2	06-01-2005 06-01-2005
US 2004095801	A1	20-05-2004	JP 2004172614 A	17-06-2004
FR 2832542	A	23-05-2003	FR 2832542 A1 EP 1466329 A2 WO 03043017 A2 US 2005002228 A1	23-05-2003 13-10-2004 22-05-2003 06-01-2005
US 6385082	B1	07-05-2002	NONE	
WO 0079540	A	28-12-2000	AU 6121100 A EP 1196925 A1 WO 0079540 A1 US 6535416 B1	09-01-2001 17-04-2002 28-12-2000 18-03-2003
JP 11175921	A	02-07-1999	JP 3148703 B2	26-03-2001
WO 03094170	A	13-11-2003	US 2003206434 A1 WO 03094170 A2 EP 1502264 A2	06-11-2003 13-11-2003 02-02-2005
US 2003007398	A1	09-01-2003	NONE	
US 2003123282	A1	03-07-2003	US 2002089874 A1 CN 1365117 A EP 1225592 A2 JP 2002245774 A TW 519644 B	11-07-2002 21-08-2002 24-07-2002 30-08-2002 01-02-2003
FR 2829867	A	21-03-2003	FR 2829867 A1 EP 1438722 A1 WO 03025946 A1	21-03-2003 21-07-2004 27-03-2003
WO 03077257	A	18-09-2003	WO 03077257 A1	18-09-2003
US 5933365	A	03-08-1999	AU 8148298 A CA 2269857 A1 DE 69827598 D1 EP 0938731 A1 RU 2214009 C2 TW 421893 B WO 9858385 A1	04-01-1999 23-12-1998 23-12-2004 01-09-1999 10-10-2003 11-02-2001 23-12-1998

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**